УДК 620.179.14

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОПЕРЕЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ПРОВОДНИКА

А.Е. Гольдштейн, А.Р. Свендровский*

Томский политехнический университет
E-mail: algol@ephd.tpu.ru
*ООО «ЭРМИС+». г. Томск
E-mail: ermis@mail.tomsknet.ru

Предложена конструкция трансформаторного измерительного преобразователя, основной сферой использования которого является измерение эксцентриситета жилы электрического кабеля. Получено аналитическое выражение для определения функции преобразования. Предложена методика определения оптимальных геометрических параметров преобразователя.

Задача измерения поперечных перемещений прямолинейного проводника относительно его продольной оси возникает в различных отраслях науки и техники. В частности, в кабельной промышленности при контроле процесса экструзионного нанесения изоляции требуется осуществлять измерение как наружного диаметра оболочки кабеля, так и эксцентриситета его токопроводящего проводника относительно продольной оси оболочки. Ввиду высокой температуры оболочки кабеля и незавершенности на данной стадии процесса ее затвердевания, не могут быть использованы как контактные средства измерений, так и эффективные способы центрирования оболочки кабеля относительно продольной оси первичного измерительного преобразователя. Наиболее совершенный метод измерения указанных геометрических параметров кабеля реализован в разработках лидеров кабельного приборостроения: "Sikora Industrieelektronik" (Германия), "Beta Instr Co" (Великобритания), "Zumbach Electronic Automatic" (Швейцария), ООО "ЭРМИС+" (Россия) [1–4].

Сущность данного метода заключается в измерениях наружного диаметра и местоположения оболочки кабеля с использованием оптического преобразователя, местоположения электропроводящей жилы кабеля с использованием трансформаторного преобразователя и определении эксцентриситета жилы кабеля на основе совместной обработки информации о местоположении оболочки и жилы кабеля. Высокие метрологические параметры реализующих данный метод приборов достигаются за счет использования достаточно сложных конструктивных и схемных решений. Препятствием для использования приборов зарубежных фирм на отечественных кабельных предприятиях являются высокая стоимость аппаратуры и повышенные требования к условиям ее применения в технологическом потоке изготовления кабеля. В связи с этим сотрудниками кафедры информационно-измерительной техники Томского политехнического университета совместно с сотрудниками фирмы "ЭРМИС+" (Россия, г. Томск) ведутся исследования по совершенствованию метода и средств измерения диаметра оболочки кабеля и эксцентриситета его жилы с целью создания аппаратуры, устраивающей отечественных потребителей по совокупности критериев: цена, точность измерения, удобство применения.

В данной работе рассматривается важная часть этой задачи, связанная с выбором оптимальных конструкции и геометрических параметров двухкоординатного трансформаторного измерительного преобразователя поперечных перемещений токоведущей жилы, характеристики которого во многом определяют характеристики измерителя в целом. Вопросы, связанные с совершенствованием оптического канала измерения геометрических параметров оболочки, метода и устройства измерения эксцентриситета будут рассмотрены в последующих работах.

Используемый в известных разработках метод измерения поперечных перемещений проводника основан на возбуждении вокруг проводника переменного магнитного поля путем пропускания через него электрического тока (тока возбуждения) и зависимости от поперечных перемещений проводника сигнала дифференциального индукционного преобразователя. На рис. 1 показана конструкция реализующего данный метод измерительного преобразователя, описание которой приводится в [5].

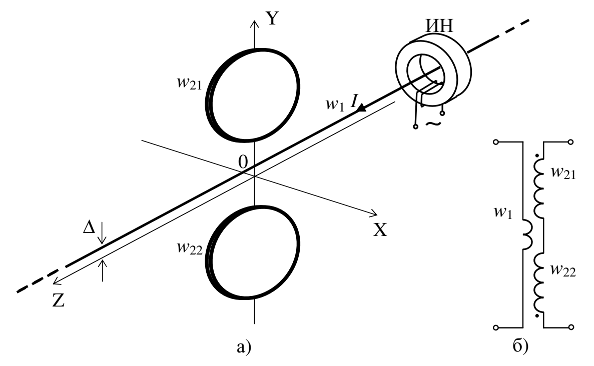


Рис. 1. *Конструкция (а) и принципиальная электрическая схема (б) традиционного измерительного транс-форматорного преобразователя: w_1 – проводник с током (обмотка возбуждения); w_{21}, w_{22} – секции измерительной обмотки; ИН – индуктор*

Рассматриваемый преобразователь по своей физической сущности является трансформаторным. Функции обмотки возбуждения выполняет сам проводник, соответственно функции измерительной обмотки выполняет индукционный преобразо-

ватель. Пропускание по проводнику тока возбуждения может осуществляться как контактным способом, так и бесконтактно. В первом случае проводник непосредственно подключается к выходу генератора переменного тока. Во втором случае используется специальный индуктор, представляющий собой трансформатор на сердечнике кольцевого типа. Первичная обмотка этого трансформатора подключается к выходу генератора, а вторичной обмоткой трансформатора является пропущенный через кольцо сердечника контролируемый проводник (рис. 1). Дифференциальный индукционный преобразователь имеет две одинаковые секции w_{21} и w_{22}, витки которых лежат в плоскости ZOY. Геометрическая ось симметрии индукционного преобразователя OZ совпадает с его электрической осью, характеризующейся равенством нулю сигнала преобразователя при совмещении с этой осью продольной оси проводника. При смещении оси проводника относительно оси OZ в плоскости ZOY на выходе индукционного преобразователя возникает сигнал, функционально связанный со значением смещения Δ. На рис. 1 показан только один индукционный преобразователь, предназначенный для измерения смещения по оси OY. Реально же имеется еще один такой же преобразователь для измерения смещения по оси OX, обмотки которого расположены в ортогональной плоскости ZOX.

Недостаток преобразователя (рис. 1) заключается в том, что при смещении проводника по одной из осей, сигнал возникает не только в индукционном преобразователе, предназначенном для измерения смещения по этой оси, но и в ортогональном индукционном преобразователе, предназначенном для измерения смещения по ортогональной оси. Другим недостатком преобразователя является нелинейность функции преобразования смещения в электрический сигнал. Теоретически указанные недостатки могут быть устранены путем сложной совместной вычислительной обработки сигналов обоих индукционных преобразователей. Однако алгоритм такой обработки должен корректироваться для каждого значения диаметра проводника, что является крайне неудобным и практически не реализуемым. В работе [5] для повышения точности измерения предлагается использовать механический привод, с помощью которого в процессе контроля осуществляется автоматическое центрирование проводника относительно оси преобразователя. Таким образом обеспечивается работа преобразователя в диапазоне поперечных смещений, в котором недостатки преобразователя (рис. 1) практически не проявляются. Реализация данного технического решения в известных разработках хотя и позволила достичь высоких метрологических параметров, но во многом определила высокую стоимость и низкие эксплуатационные параметры этих разработок.

Нами предлагается более эффективное техническое решение, позволяющее достичь высоких метрологических параметров измерителя за счет выбора оптимальных конструкции и геометрических параметров трансформаторного измерительного преобразователя без применения механического привода и усложнения электронной схемы. На рис. 2 показана конструкция предлагаемого измерительного преобразователя. Как и в преобразователе-прототипе функции обмотки возбуждения выполняет сам контролируемый проводник. Отличие предлагаемой конструкции заключается в том, что каждая измерительная обмотка, предназначенная для измерения координат оси проводника в одной из ортогональных плоскостей, имеет четыре последовательно соединенные прямоугольные секции. На рисунке показаны секции обмотки, предназначенной для измерения смещения по оси OY. По сути дела каждая из встречно включенных секций преобразователя-прототипа заменена парой согласно включенных секций, витки которых лежат в симметричных плоскости ZOY параллельных плоскостях. Ниже будет показано, что выбором оптимального соотношения геометрических параметров такого преобразователя могут быть достигнуты высокая линейность функции преобразования и независимость сигнала в обмотке, предназначенной для измерения смещения по одной оси, от смещения по ортогональной оси в широком диапазоне измеряемых смещений.

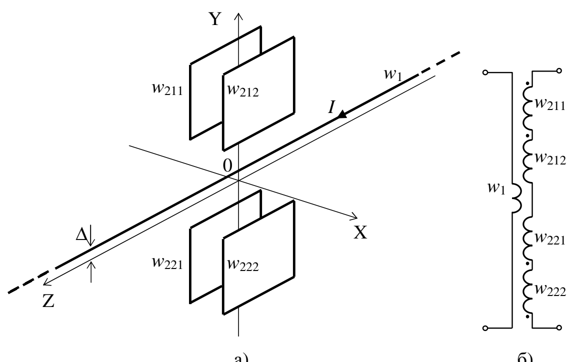


Рис. 2. *Конструкция (а) и принципиальная электрическая схема (б) предлагаемого измерительного трансфор-маторного преобразователя: w_1 – проводник с током (обмотка возбуждения); w_{211}, w_{212}, w_{221}, w_{222} – секции измерительной обмотки*

На рис. 3 показано сечение предлагаемого преобразователя плоскостью XOY. Здесь использовано то же самое обозначение секций обмоток, что и на рис. 2. Направление включения отдельных секций относительно контролируемого проводника отражено знаками "+" или "–".

Мгновенное значение ЭДС $e_1(t)$, наводимой магнитным полем электрического тока проводника в отдельной секции, согласно закону электромагнитной индукции равно:

$$e_1(t) = -w\frac{d\,\Phi_1(t)}{dt},$$

где w – число витков секции; $\Phi_1(t)$ – изменяющийся во времени магнитный поток, пронизывающий витки секции.

Согласно [6] для прямолинейного проводника с током I магнитный поток Φ, заключенный между

парой продольных линий, расположенных на расстояниях r_1 и r_2 от оси проводника и рассчитанный на единицу длины проводника, равен:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{2\pi} I \ln\frac{r_2}{r_1}, \qquad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

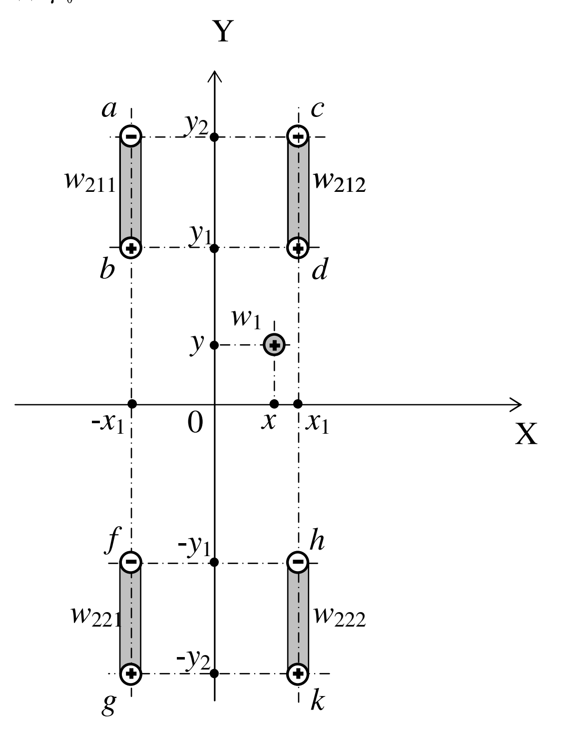


Рис. 3. *Геометрия задачи (сечение преобразователя плоскостью XOY)*

На основании (1) для прямоугольной секции обмотки с продольным размером l и расстояниями продольных участков витков от оси проводника r_1 и r_2 могут быть записаны выражения для магнитного потока $\Phi_1(t)$ и ЭДС $e_1(t)$:

$$\Phi_1(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i(t)\, l \ln\frac{r_2}{r_1};$$
$$e_1(t) = -w\frac{\mu_0}{2\pi} l \ln\frac{r_2}{r_1}\frac{d\,i(t)}{d\,t}, \qquad (2)$$

где $i(t)$ – закон изменения мгновенного значения электрического тока проводника.

В системе координат (рис. 3) с центром, совпадающим с геометрическим центром преобразователя, расстояния продольных участков витков всех четырех секций измерительной обмотки от оси контролируемого проводника определяются выражениями:

$$r_a = \sqrt{(x+x_1)^2 + (y-y_2)^2};\ r_b = \sqrt{(x+x_1)^2 + (y-y_1)^2};$$
$$r_c = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_2)^2};\ r_d = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2};$$
$$r_f = \sqrt{(x+x_1)^2 + (y+y_1)^2};\ r_g = \sqrt{(x+x_1)^2 + (y+y_2)^2};$$
$$r_h = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y+y_1)^2};\ r_k = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y+y_2)^2},$$

где x и y – смещения оси проводника соответственно по осям OX и OY; x_1 – расстояние от продольной плоскости симметрии преобразователя ZOY до плоскостей витков секций измерительной обмотки; y_1 и y_2 – расстояния от продольной плоскости симметрии преобразователя ZOX до продольных участков витков секций измерительной обмотки.

На основании (2) можно записать выражение, определяющее суммарную ЭДС $e(t)$ всех секций измерительной обмотки:

$$e(t) = -w\frac{\mu_0}{2\pi} l \ln\frac{r_a\, r_c\, r_f\, r_h}{r_b\, r_d\, r_g\, r_k}\frac{d\,i(t)}{d\,t}.$$

В этом выражении можно выделить множитель $K(x,y)$, зависящий от координат оси контролируемого проводника (его смещения относительно оси преобразователя) и от координат осей продольных участков витков секций измерительной обмотки (поперечных геометрических размеров преобразователя):

$$K(x,y) = \ln\frac{r_a\, r_c\, r_f\, r_h}{r_b\, r_d\, r_g\, r_k}.$$

Именно множитель $K(x,y)$, который будем называть в дальнейшем координатным множителем, определяет как характер функции преобразования, так и его зависимость от геометрических параметров преобразователя. Задача оптимизации, таким образом, сводится к определению геометрических параметров преобразователя, обеспечивающих независимость координатного множителя $K(x,y)$ от изменения координаты x и линейную зависимость $K(x,y)$ от изменения y. Математическими записями этих двух условий являются соответственно равенство нулю первой производной функции $K(x,y)$ по переменной x и равенство нулю второй производной функции $K(x,y)$ по переменной y:

$$\frac{dK(x,y)}{dx} = 0;\quad \frac{d^2K(x,y)}{dy^2} = 0. \qquad (3)$$

Более подробно остановимся на решении первого уравнения, распространив в дальнейшем основные подходы к его решению и для второго уравнения.

В результате дифференцирования функции $K(x,y)$ по переменной x получаем:

$$\frac{dK(x,y)}{dx} =$$
$$= \frac{x+x_1}{(x+x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \frac{x-x_1}{(x_1-x)^2 + (y-y_1)^2} -$$
$$- \frac{x+x_1}{(x_1+x)^2 + (y+y_1)^2} - \frac{x-x_1}{(x_1-x)^2 + (y+y_1)^2} -$$
$$- \frac{x+x_1}{(x+x_1)^2 + (y-y_2)^2} - \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_2)^2} +$$
$$+ \frac{x+x_1}{(x+x_1)^2 + (y+y_2)^2} + \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + (y+y_2)^2}. \qquad (4)$$

Анализ этого выражения показывает, что его можно представить суммой двух слагаемых:

$$\frac{dK(x,y)}{dx} = K_1(x,y,y_1) + K_2(x,y,y_2),$$

где $K_1(x,y,y_1)$ и $K_2(x,y,y_2)$ – соответственно первые и последующие четыре слагаемые выражения (4), являющиеся функциями геометрических параметров преобразователя y_1 и y_2.

Если приравнять по отдельности $K_1(x,y,y_1)$ и $K_2(x,y,y_2)$ нулю и решить эти уравнения относительно x_1, получим два действительных положительных корня:

$$x_1' = \frac{1}{3}\left[\begin{array}{l} 6(x^4 + x^2 y_1^2 + y_1^4 + x^2 y^2 - y^2 y_1^2 + y^4)^{\frac{1}{2}} - \\ -3y^2 - 3y_1^2 + 3x^2 \end{array}\right]^{\frac{1}{2}};$$

$$x_1'' = \frac{1}{3}\left[\begin{array}{l} 6(x^4 + x^2 y_2^2 + y_2^4 + x^2 y^2 - y^2 y_2^2 + y^4)^{\frac{1}{2}} - \\ -3y^2 - 3y_2^2 + 3x^2 \end{array}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальное значение параметра x_1 зависит главным образом от значений координат y_1 и y_2 продольных участков витков секций обмоток. При этом определяющее значение на характер функции преобразования оказывает соотношение значений геометрических параметров x_1 и y_1. Соотношение x_1 и y_2 оказывает некоторое влияние только на амплитуду сигнала, а на характер функции преобразования существенного влияния не имеет. Поэтому для большинства практических задач следует использовать при выборе оптимального значения x_1 первое из выражений (5). Для случая $x=0$ и $y=0$ (продольная ось проводника совпадает с продольной осью измерительного преобразователя) с учетом предыдущего замечания получаем:

$$x_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} y_1. \quad (6)$$

Согласно (5) оптимальное значение параметра x_1 зависит от координат оси контролируемого проводника. Однако эту зависимость в большинстве практических случаев можно считать несущественной. Как показывает численный анализ, для преобразователя с соотношением геометрических параметров (6) в диапазоне смещений проводника по оси OY в пределах ($-0,2y_1$; $0,2y_1$) изменение значения функции преобразования при смещении проводника по оси OX в тех же пределах не превышает 1 %.

Аналогичным образом находится решение второго из уравнений (3). С учетом ранее сделанного замечания относительно определяющего влияния на характер функции преобразования соотношения значений геометрических параметров x_1 и y_1 находим после двойного дифференцирования условие равенства нулю второй производной функции $K(x,y)$ по переменной y:

$$x_1''' = \frac{1}{3}\left[\begin{array}{l} 6(x^4 + x^2 y_1^2 + y_1^4 + x^2 y^2 - y^2 y_1^2 + y^4)^{\frac{1}{2}} - \\ -3y^2 - 3y_1^2 + 3x^2 \end{array}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Совместный анализ выражений (5) и (7) показывает, что оптимальное соотношение геометрических параметров x_1 и y_1 с точки зрения линейности функции преобразования совпадает для предлагаемого преобразователя с оптимальным соотношением этих же параметров с точки зрения независимости функции преобразования от смещения проводника в ортогональном измеряемому смещению направлении. Таким образом, соотношение (6) является универсальным при выборе оптимальных геометрических параметров преобразователя.

На рис. 4 сплошными линиями показаны зависимости координатного множителя $K(x,y)$ от изменения измеряемой координаты y и от изменения координаты x при смещении проводника в ортогональном направлении для предлагаемого преобразователя при оптимальном соотношении геометрических параметров x_1 и y_1. Пунктирными линиями показаны аналогичные зависимости для преобразователя-прототипа.

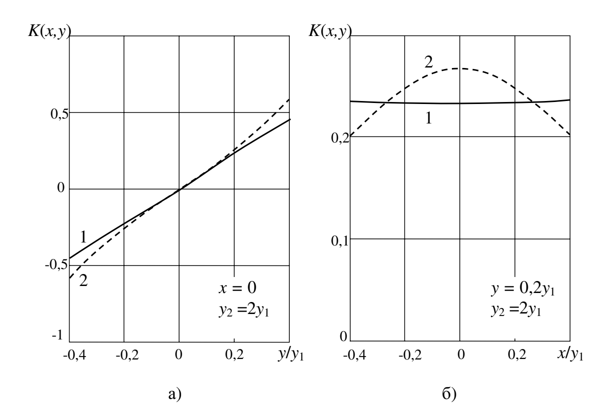


Рис. 4. *Зависимость координатного множителя K(x,y) от изменения измеряемой координаты оси проводника y (а) и от изменения ортогональной координаты x (б) для предлагаемого преобразователя (1) и преобразователя-прототипа (2)*

Сравнительный анализ зависимостей сигналов преобразователей от изменения координат проводника показывает, что функция преобразования предлагаемого преобразователя, имеющего оптимально выбранные конструктивные параметры, характеризуется на порядок большей линейностью и на порядок меньшей зависимостью от смещения проводника в ортогональном измеряемому смещению направлении. Сопоставление результатов расчетов, выполненных с использованием предложенной математической модели измерительного преобразователя, с экспериментальными данными показывает их достаточно высокое совпадение. Расхождение результатов математического и физического моделирования находится в пределах суммарной погрешности используемых при экспериментах средств измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Web-site "Sikora Industrieelektronik". – http://www.sikora.com
2. Web-site "Beta Instr Co". – http://www.beta.com
3. Web-site "Zumbach Electronic Automatic". – http://www.zumbach.com
4. Web-сайт ООО "ЭРМИС+". – http://www.ermis.tomsk.ru
5. Pat. WO 03085354. EC G01B 11/10. Contactless system for measuring centricity and diameter / Zumbach Electronic AG (CH). Publ. 16.10.2003, esp@cenet database. – 18 p.: Il.
6. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968. – 464 с.

УДК 621.314.632